



MODÉLISATION EMPIRIQUE DE LA TRANSMISSIVITÉ DES AQUIFÈRES DE SOCLE DE CÔTE D'IVOIRE

EMPIRICAL TRANSMISSIVITY MODELING OF PEDESTRAL AQUIFER OF IVORY COAST

KOUASSI A. M.^{1*}, LOBA M. C.², KOUAMÉ K. A.³, KOUAMÉ K. F.³, BIEMI J.³

¹. Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) ; Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi) ; Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques ; BP 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire),

². Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro ; Ecole Supérieure des Mines et de Géologie (ESMG) ; Bp: 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire).

³. Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM) ; Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE) ; 22 BP 582 Abidjan 22 (Côte d'Ivoire).

**Auteur Correspondant : michel.a_kouassi@yahoo.fr*

RÉSUMÉ

L'objectif de cette étude est la modélisation de la transmissivité au niveau des aquifères de socle à partir du débit spécifique. Les zones tests utilisées dans le cadre de cette étude sont l'ex-région du N'zi-Comoé (domaine paléoprotérozoïque) et la région Guiglo-Duekoué (domaines archéen-SASCA). Une importante base de données des valeurs de transmissivité et de débits spécifiques a été compilée. L'approche méthodologique est basée sur l'étude de la relation entre la transmissivité et le débit spécifique à partir d'une procédure empirique du type $T = \alpha Q_s^\beta$. La qualité des modèles développés a été analysée à partir du coefficient de corrélation, du test *t* de Student, du biais sur la moyenne et de la racine carrée de l'erreur quadratique. Les valeurs de débits spécifiques au niveau de la région de Guiglo-Duekoué varient entre $1,427 \cdot 10^{-2}$ et $2,571 \text{ m}^2/\text{h}$ avec une moyenne de $0,279 \text{ m}^2/\text{h}$ et un coefficient de variation de 159%. Les débits spécifiques moyens et forts représentent 61,22%. Quant à la région de l'ex-N'zi-Comoé, les débits spécifiques vont de $7,752 \cdot 10^{-3}$ à $3,03 \text{ m}^2/\text{h}$ avec une

moyenne de 0,402 m²/h, un coefficient de variation de 116% et un taux de 82% en ce qui concerne les débits spécifiques moyens et forts. Les valeurs de transmissivité de la région de Guiglo-Duekoué fluctuent entre 1,779.10⁻³ et 1,952 m²/h avec une moyenne de 0,283 m²/h et un coefficient de variation de 135%. Les forages de moyennes et fortes transmissivités représentent 73,47%. Pour ce qui concerne la région de l'ex-N'zi-Comoé, la transmissivité oscille entre 6,2.10⁻³ et 1,302 m²/h avec une moyenne de 0,196 m²/h et un coefficient de variation de 123%. Les forages ayant des valeurs de transmissivité moyennes et fortes sont estimés à 68,66%. Les résultats de l'ajustement ont montré que les données de transmissivité et du débit spécifique, transformées selon la fonction log, suivent la loi normale. La distribution des variables selon la loi log-normale a permis donc d'envisager une modélisation de la relation $T=f(Q_s)$. Ainsi, deux relations empiriques performantes ont été établies. Les deux modèles conçus sont respectivement $T_1=0,354Q_s^{0,8544}$ avec $R^2=0,70$ pour la région du N'zi-Iffou-Moronou (ex-région du N'zi-Comoé) et $T_2=1,086Q_s^{1,187}$ avec $R^2=0,60$ pour la région de Guiglo-Duekoué. Ces modèles empiriques peuvent être utiles pour d'autres aquifères présentant des conditions hydrogéologiques similaires. Cependant, ces modèles pourraient être améliorés en corrigeant le débit spécifique des pertes de charge.

Mots clés: Transmissivité, Débit spécifique, Modélisation empirique, Aquifères de socle, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

The objective of this study is modeling the transmissivity of the hard rock aquifers from the specific capacity. The areas tested used for this study are the region of N'zi-Comoé (Paleoproterozoic domain) and Guiglo-Duékoué region (Archean-SASCA domains). A large database of transmissivity and specific capacity values was compiled. The methodological approach is based on the study of the relationship between the transmissivity and specific capacity from an empirical procedure of the form $T=\alpha Q_s^\beta$. The quality of the developed models was analyzed from the correlation coefficient, the Student *t* test, the bias on the mean and the square root of the quadratic error. The values of specific capacity in the Guiglo-Duekoué region ranging from 1.427.10⁻² to 2.571 m²/h with an average of 0.279 m²/h and a coefficient of variation of 159%. The medium and high specific capacities represent 61.22%. As for the region of the N'zi-Comoé, the specific capacity range from 7.752.10⁻³ to 3.03 m²/h with an average of 0.402 m²/h, a variation coefficient of 116% and a rate of 82% in respect of the medium and high specific capacities. The transmissivity values of

Guiglo-Duekoué region fluctuate between $1.779 \cdot 10^{-3}$ to $1.952 \text{ m}^2/\text{h}$ with an average of $0.283 \text{ m}^2/\text{h}$ and a coefficient of variation of 135%. Average and high drilling transmissivity represent 73.47%. As regards the region of the N'zi-Comoé, the transmissivity varies between $6.2 \cdot 10^{-3}$ to $1.302 \text{ m}^2/\text{h}$ with an average of $0.196 \text{ m}^2/\text{h}$ and a coefficient of variation of 123%. Drilling with medium and high transmissivity values are estimated at 68.66%. The results of the adjustment showed that the transmissivity and the specific capacity, processed by the log function follows the normal distribution. The distribution of variables according to lognormal therefore possible to envisage a model of the relationship $T=f(Q_s)$. Thus, two powerful empirical relationships have been established. Both models are designed respectively $T_1=0.354Q_s^{0.8544}$ with $R^2=0.70$ for the region of N'zi-Iffou-Moronou (region of N'zi-Comoé) and $T_2=1.086Q_s^{1.187}$ with $R^2=0.60$ for the Guiglo-Duekoué region. These empirical models may be useful for other aquifers with similar hydrogeological conditions. However, these models could be improved by correcting the specific capacity losses.

Key words: Transmissivity, Specific capacity, Empirical modeling, Hard rock aquifers, Ivory Coast.

INTRODUCTION

La mesure la plus fiable des paramètres hydrodynamiques des aquifères (transmissivité et coefficient d'emmagasinement) est faite à partir des résultats des essais de pompage de longue durée (72 heures). Cependant, il y a souvent peu d'essais de pompage de longue durée disponibles dans nos régions. La densité de données est donc faible et les interpolations pour obtenir les champs de ces paramètres en général et de la transmissivité en particulier à l'échelle d'une région sont alors peu réalistes. Alors que la transmissivité exprime la productivité d'un aquifère et permet d'avoir des connaissances suffisantes sur les ressources en eau souterraine d'une région donnée. Elle peut être déterminée en phase de descente suite à un pompage comme en phase de remontée par des méthodes issues de la méthode de Théis (méthode de Cooper-Jacob par exemple). Aussi, la transmissivité peut-elle être déduite des données de débits spécifiques disponibles, en utilisant une approche analytique, empirique ou géostatistique. En effet, le débit spécifique se définit comme le rapport entre le débit de pompage et le rabattement induit. Aussi, les informations relatives au débit spécifique sont généralement plus nombreuses que celles de la transmissivité dans les différentes bases de données du fait que le débit spécifique constitue un paramètre facilement mesurable (Razack et Lasm,

2006). La transmissivité est souvent estimée en utilisant des données de débits spécifiques quand les données de pompage d'essai ne sont pas disponibles ou quand l'abaissement du niveau est rapidement stabilisé, comme dans le cas des couches karstifiées ou dans les nappes alluviales à « niveau d'eau constant » (Sebaiti et al., 2012). L'estimation de la transmissivité par des relations empiriques est utile pour pallier le manque de données dans les études de modélisation. L'utilisation du débit spécifique pour déterminer la transmissivité est une approche intéressante surtout quand les données disponibles ne sont pas suffisantes pour entreprendre une estimation par les méthodes géostatistiques (Srivastav et al., 2007 *in* De Lasme et al., 2012). Plusieurs modèles empiriques ont été établis dans le domaine cristallin ivoirien (Razack et Lasm, 2006 ; Soro et al., 2010 ; Onetie et al., 2010 ; Lasm et al., 2012 ; De lasme et al., 2012 ; Gnamba et al., 2014). Cependant, le caractère empirique de ces modèles a pour conséquence d'être plus réaliste dans les zones où ceux-ci ont été établis d'où la nécessité de développer des modèles dans les zones où il y a absence de modèles locaux.

Ainsi, l'objectif de cette étude est la modélisation de la transmissivité au sein des aquifères de socle à partir du débit spécifique. L'approche méthodologique est basée sur la détermination d'une relation empirique entre la transmissivité (T) et le débit spécifique (Q_s) (Jalludin et Razack, 2004 ; Hamm et al., 2005 ; Razack et Lasm, 2006 ; Yidana et al., 2007 ; Rotzoll et EL-Kadi, 2008 ; Soro et al., 2010 ; Onetie et al., 2010 ; Lasm et al., 2012 ; De lasme et al., 2012 ; Gnamba et al., 2014).

CONTEXTES GÉOGRAPHIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Deux zones tests ont été utilisées dans le cadre de cette étude (Figure 1). La région du N'zi-Iffou-Moronou (ex-région du N'zi-Comoé), qui est la première zone test, est comprise entre les longitudes 3°40' et 4°55' Ouest et les latitudes 6°20' et 8°10' Nord. La deuxième zone test est la région de Guiglo-Duékoué située à l'Ouest de la Côte d'Ivoire précisément entre les latitudes 7°00 et 7°42 Nord et les longitudes 6°28 et 6°50 Ouest.

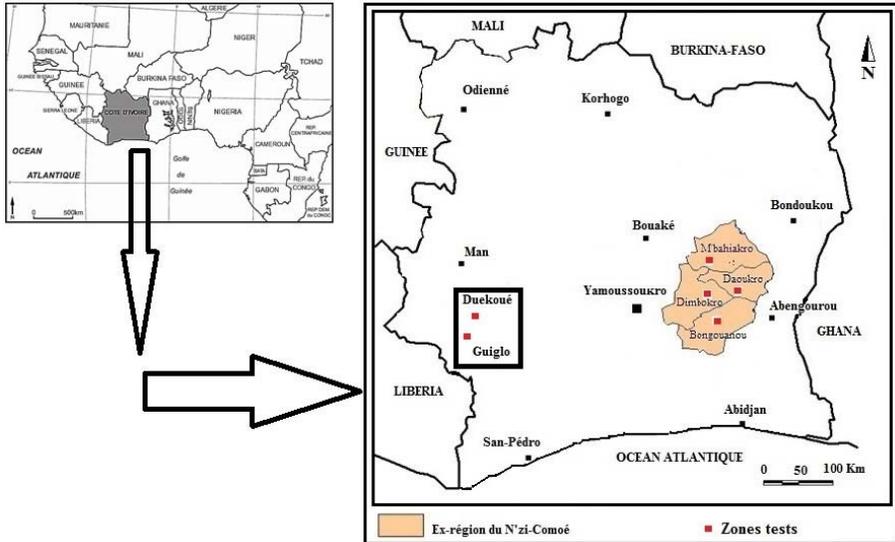
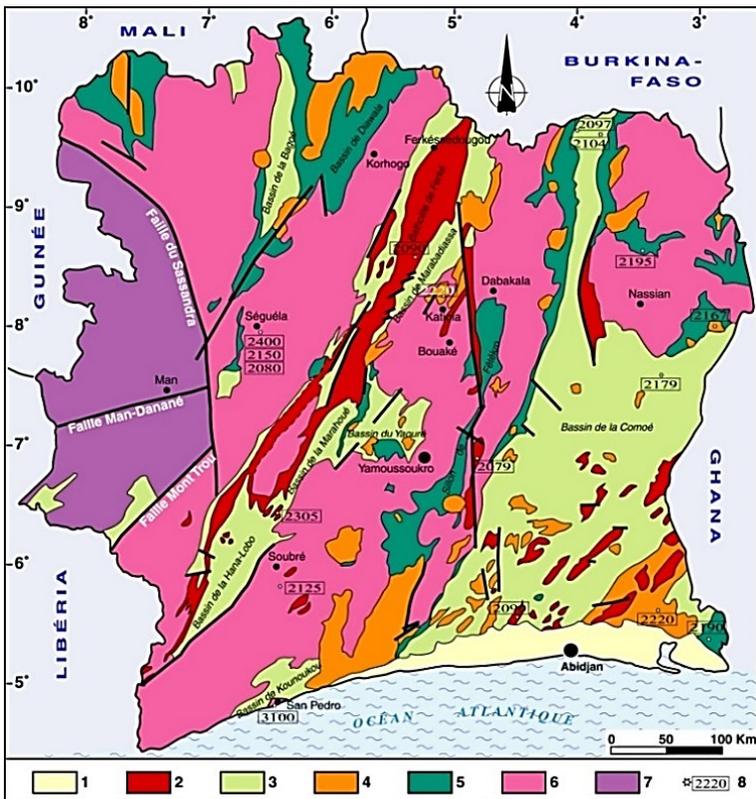


Figure 1 : Présentation des zones tests.

Le socle ivoirien est composé des domaines archéen, paléoprotérozoïque et SASCA (Figure 2). Le domaine archéen a été affecté par des déformations tectoniques très importantes attribuées à l'orogénèse léonienne (3500-2900 Ma) et à l'orogénèse libérienne (2900-2500 Ma). Il est caractérisé par les reliefs les plus accidentés de la Côte d'Ivoire. Ce domaine est dominé par des granites, des migmatites, des granito-gneiss, des amphibolo-pyroxénites, des charnockites. Le domaine paléoprotérozoïque est subdivisé en deux grands sous-ensembles (ensemble des granitoïdes et formations volcano-sédimentaires). Il a été structuré au cours du mégacycle éburnéen. Ce domaine est constitué d'un socle granito-gneissique dominé par les granites et des formations volcano-sédimentaires (métasédiments et roches vertes). Les métasédiments sont constitués en majeure partie de grès et de schistes. Les roches vertes sont constituées de metabasalte, métaandésite, métadolérite, métagabbro, amphibolite. Il existe un autre domaine où coexistent les formations géologiques des deux grands domaines (domaine archéen et domaine paléoprotérozoïque): c'est le domaine SASCA (Sassandra-Cavally). Ce domaine est situé dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire depuis Toulepleu, Soubré, Sassandra, Taï jusqu'au fleuve Cavally et est drainé par les fleuves Sassandra et Cavally. Sa particularité est qu'on y trouve à la fois des roches issues de l'orogénèse libérienne et des orogénèses les plus récentes

(Burkinienne et Eburnéenne) (Kouamelan, 1996). Les formations rencontrées dans le domaine SASCA sont les schistes, les micaschistes, les arkoses, les quartzites, les tufs métamorphiques, les metarhyolites, les amphibolites, les metagabbros, les conglomérats, des tufs métamorphiques, les migmatites, les quartzites, les gneiss et les leptynites.



1. Formations post-birimiennes (bassins sédimentaire côtier).
2. Granitoïdes à deux micas associés ou non aux structures décrochant méridiennes.
3. Bassins sédimentaires et volcano-sédimentaires.
4. Granitoïdes calco-alcalins localisés dans les bassins sédimentaires.
5. Volcanisme et volcano-sédiments indifférenciés.
6. Granitoïdes et granites rubanés gneiss et migmatites indifférenciés (âges supérieurs à 2,4 Ma).
7. Domaine archéen.
8. Ages.

Figure 2 : Carte géologique de la Côte d'Ivoire (Tagini, 1971).

La région de l'ex-N'zi-Comoé appartient au domaine paléoprotérozoïque encore appelé domaine baoulé-mossi (Figure 3). Du point de vue lithologique, la zone d'étude est recouverte par un ensemble complexe de formations géologiques constituées essentiellement de roches ignées, métamorphiques et volcano-sédimentaires (Yao, 1998). On distingue les roches éburnéennes et les roches birimiennes. Les roches éburnéennes sont constituées essentiellement de granitoïdes notamment les granites à deux micas, les granites à biotite homogènes et hétérogènes, et les granodiorites. Les formations birimiennes sont essentiellement des métasédiments et des roches vertes (métavulcanites). Les métasédiments sont constitués en majeure partie de grès et de schistes. Les roches vertes sont constituées de metabasalte, métaandésite, métadolérite, mégabbro, amphibolite.

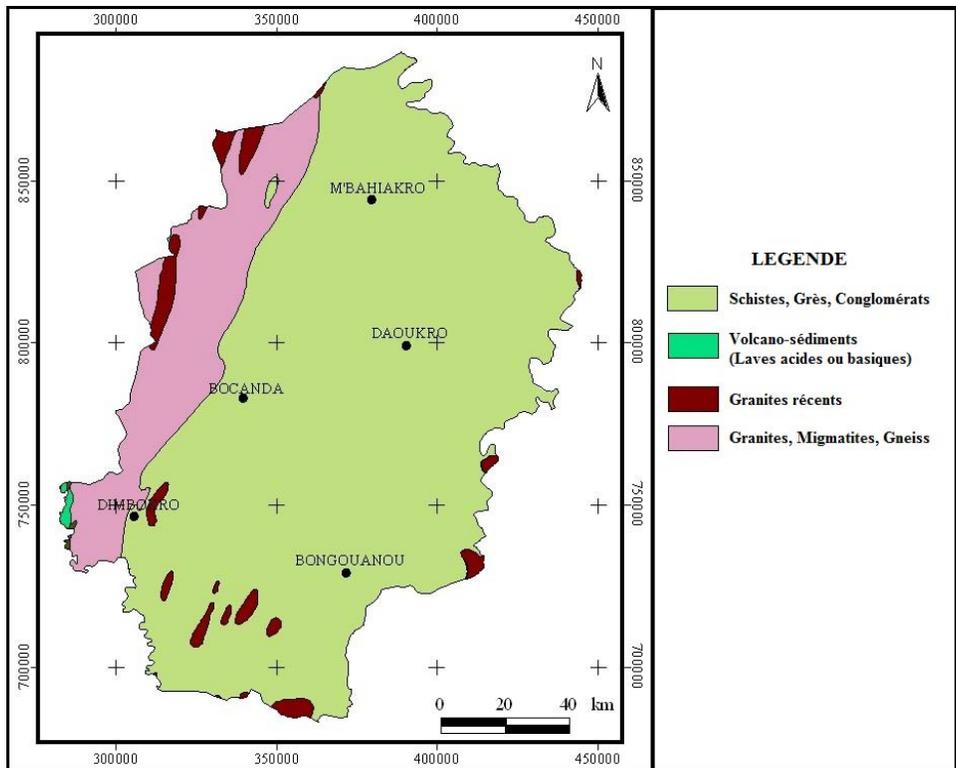


Figure 3 : Carte géologique de l'ex-N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire)

Les différentes formations géologiques ont été affectées par plusieurs systèmes d'accidents majeurs (Yao, 1998 ; Koita et al., 2010 ; N'go et al., 2010). Ces fractures sont de direction préférentiellement Nord-Sud. Ces formations géologiques ont été également touchées par le phénomène d'altération. Ainsi, l'altération sur le substratum schisteux est particulièrement épaisse et argileuse. Elle est en moyenne d'une trentaine de mètres et peut atteindre 60 m. En effet, les roches plus ou moins riches en minéraux ferromagnésiens, en minéraux calciques, en plagioclases, en silice et en oxydes, ont une altération qui conduit à la formation d'argiles. L'altération des granites est essentiellement sableuse et peu épaisse (inférieure à 10 m).

Le secteur Guiglo-Duekoué est à cheval sur le domaine Archéen (Guiglo) et le domaine SASCA (Duekoué) (Figure 4). La géologie de la zone d'étude s'intègre dans celle des deux domaines cités plus haut. La pétrographie des formations géologiques de la zone Guiglo-Duekoué est marquée par trois unités principales que sont: l'unité des monts Gao, l'unité des monts Douan et l'unité des migmatites à biotite et microcline. L'unité des monts Gao est constituée de métasédiments et de granitoïdes associées ou non à des quartzites ferrugineux. L'unité des monts Douan est composée de gneiss charnockitique et leptynitiques, (constitué de quartz et feldspath alcalin dominants, souvent riches en grenat, pauvres en mica et/ou amphiboles) et de gneiss à pyroxène. Elle est aussi composée de charnockites qui est une roche magmatique composée de quartz, de microclines, de plagioclases et de feldspaths alcalins. La disposition des faciès pétrographiques au sein de cette unité suggère une organisation en antiforme avec, au cœur, les charnockites et les gneiss leptynitiques sur les flancs. L'unité des migmatites à biotite et microcline est un ensemble migmatitique qui témoigne d'un important épisode de fusion anatectique des unités pétrographiques précitée. L'unité est composée principalement de quartz, de microcline, d'oligoclase, de la biotite, d'autres minéraux accessoires comme le grenat, et la muscovite. Les formations de la zone d'étude présentent une orientation préférentielle (NNE-SSW) due aux phases de tectonique souple des deux (2) orogènes (léonienne et libérienne) qui s'y sont manifestées. A ces phases, on associe le métamorphisme et la migmatisation des roches antécinématiques accompagnés du rubanement des migmatites, de la schistosité de l'ensemble schisteux et de la foliation des amphibolites. Outre ces phases de tectonique souple, une phase cassante a participé à la déformation des roches du secteur. Elle a occasionné la mise en place de filons de pegmatites, de dolérites plus ou moins importants, quelques rares filons de quartz et une granitisation considérable.

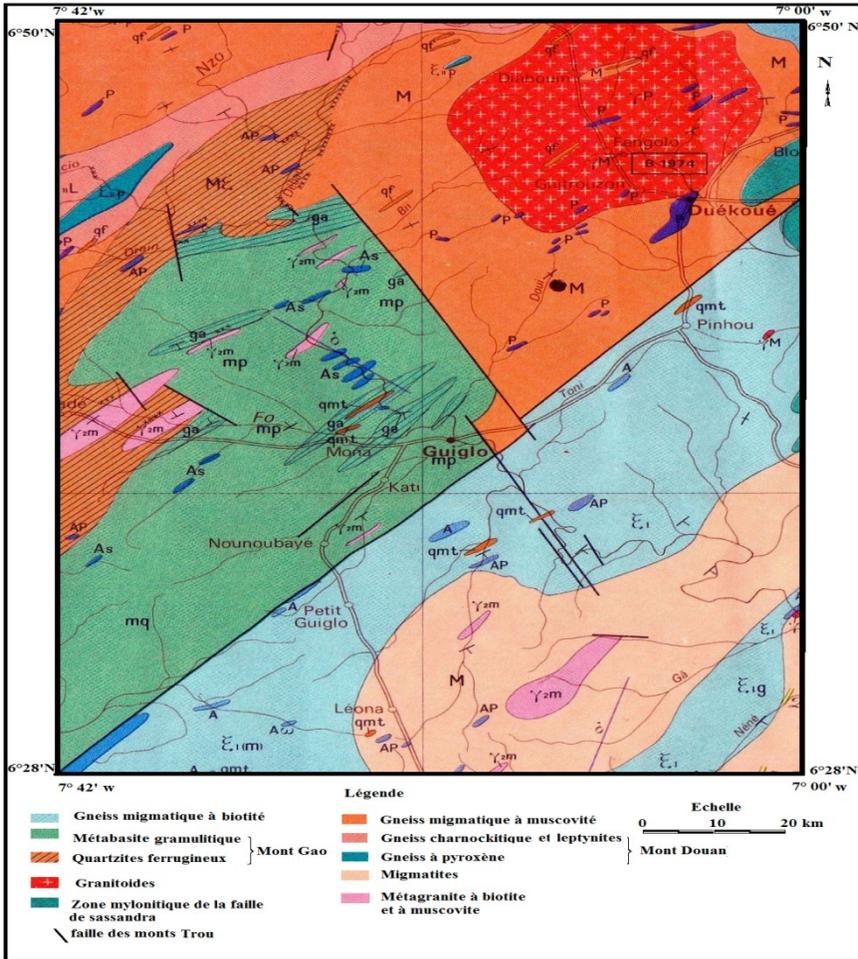


Figure 4 : Carte géologique de la zone Guiglo-Duékoué (Ouest de la Côte d'Ivoire)

En Côte d'Ivoire, les réservoirs d'eaux souterraines de socle se rencontrent dans les horizons d'altérites ainsi que dans les séries volcano-sédimentaires et granito-migmatitiques. Les réservoirs d'altérites varient selon la nature du socle. L'eau circule dans les roches cristallines à travers les réseaux de fractures à fonction drainante, généralement bien alimentés et capables de fournir des débits assez importants quand ils sont bien captés par les forages. En effet, le socle cristallin et cristallophyllien de Côte d'Ivoire a été affecté par les phénomènes tectoniques en y laissant d'importants réseaux de fissures plus ou

moins connectés qui sont à l'origine de la formation des nappes souterraines (Lasm et al., 2004; Jourda et al., 2006a,b; Lasm et al., 2008; Youanta et al., 2008; Koïta et al., 2010; N'go et al., 2010; Sorokoby et al., 2010). Deux types d'aquifères y ont pris naissance au cours des temps géologiques qui sont les aquifères d'altérites et les aquifères de fractures. A l'heure actuelle, les forages captant les fractures sont les plus sûrs et les moins influençables par les fluctuations saisonnières.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Données

Les fiches techniques des forages des programmes d'hydraulique villageoise réalisés dans l'ensemble des régions N'zi-Iffou-Moronou (ex-région du N'zi-Comoé) de 1999 à 2000 « Don Japonais, AEP-II-3 » ont été utilisées. Au total cent cinquante (150) fiches techniques représentant cent cinquante (150) forages ont été retenues pour cette étude. Les données issues de la région de Guiglo-Duekoué proviennent de la campagne de forages du projet CESPPCC (Comité d'Examen et de Suivi des Projets et Programmes de la filière Café-Cacao) concernant la réalisation des forages d'exploitation équipés de pompes à motricité humaine dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire au cours de l'année 2010. Elles ont été fournies par la Société Africaine de Forage (AFRIFOR). Ces données sont constituées de fiches techniques des forages et des données des essais de pompage. Dans le cadre de cette étude, un total de quarante-huit (48) fiches techniques de forages a été retenu. Les différentes fiches techniques de forage ont permis d'obtenir des données relatives aux paramètres de l'étude. Les débits (m^3/h) des premiers paliers ainsi que les rabattements induits (m), obtenus au cours des essais de pompages ont été utilisés pour le calcul des débits spécifiques (m^2/h). Les valeurs de transmissivité (m^2/h) ont été évaluées par la méthode de Cooper-Jacob en remontée.

Analyse statistique des paramètres de conception des modèles

Pour comparer les différents échantillons de transmissivité et de débit spécifique, le test t de Student a été appliqué au seuil de 95%. Les caractéristiques statistiques des paramètres étudiés (transmissivité et débit spécifique), telles que le minimum, le maximum, la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation ($CV = \text{écart-type}/\text{moyenne}$) ont été déterminés. Les

fréquences relatives des paramètres étudiés ont été également analysées. La formule utilisée pour déterminer le nombre de classe est la règle de Iman et Conover (C) pour un échantillon de taille n (équation 1):

$$C = \text{int}\left(\frac{\ln n}{\ln 2}\right) = \text{int}(1,443 \ln n) \quad (1)$$

NB: Int=partie entière.

Soient X_{\max} et X_{\min} respectivement les valeurs maximale et minimale observées sur l'ensemble des échantillons pour un paramètre donné et C le nombre de classes défini, l'intervalle de classe (I) est calculé par l'équation 2 :

$$I = (X_{\max} - X_{\min}) / C \quad (2)$$

On calcule ensuite à partir de « X_{\min} », les classes successives par addition de l'intervalle de classe I jusqu'à obtention de la dernière classe qui prend en compte la valeur maximale. L'étude de la normalité des échantillons de transmissivité et de débit spécifique a été effectuée à partir du logiciel Kronostat 1.01. En effet, un ajustement a été fait suivant la loi lognormale. Théoriquement un paramètre distribué suivant la loi lognormale voit ses valeurs transformées obéir à une loi normale. La qualité de ces ajustements a été vérifiée à partir du test de khi-deux au seuil de 95%.

Modélisation de la transmissivité

L'intérêt de l'étude des relations empiriques entre la transmissivité (T) et le débit spécifique (Q_s) pour les aquifères fracturés n'est plus à démontrer (Kruseman et De ridder, 1973 in Sinan et Razack, 2006). Pour justifier la détermination de la transmissivité sur la base des données de débits spécifiques, il est nécessaire de comprendre que la transmissivité est linéairement proportionnelle au débit spécifique d'un puits selon l'équation de Thiem (Guerin, 2005). Cette équation peut être appliquée aux aquifères non confinés quand le rabattement est insignifiant comparé à l'épaisseur de l'aquifère. Le débit spécifique est homogène à la transmissivité et en constitue une approximation acceptable dans certaines conditions (Lasm et al., 2008). L'analyse statistique de ces paramètres indique que le débit spécifique et la transmissivité sont distribués suivant la loi log-normale (Razack et Lasm, 2006; Soro et al., 2010 ; Onetie et al., 2010 ; Lasm et al., 2012 ; De lasme et al., 2012 ; Gnamba et al., 2014).

En effet, pour les propriétés physiques et hydrodynamiques (notamment les transmissivités et les débits spécifiques), il est admis que leurs lois de probabilité suivent une loi lognormale. Par conséquent, une transformation logarithmique a été appliquée à ces deux variables. Des représentations graphiques de $\log(T)$ en fonction de $\log(Q/s)$ ont été réalisées. Par principe, le nuage de points doit présenter une certaine tendance et les différents points doivent s'aligner suivant une droite. Cette relation peut s'écrire sous la forme d'une loi puissance (équation 3) :

$$T = \alpha(Q_s)^\beta \quad (3)$$

Avec :

T: transmissivité (m^2/h);

Q_s : débit spécifique (m^2/h);

α et β : coefficients de régression de la relation puissance.

La performance d'un modèle issu d'une méthode d'apprentissage s'évalue par sa capacité de prédiction ou de généralisation. En effet, les critères de performance mesurent la qualité ou la confiance que l'on peut accorder aux résultats d'une simulation. Pour évaluer la performance des modèles développés dans cette étude, les critères utilisés sont le test t de Student au seuil de signification de 95%, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et la moyenne biaisée (B), qui sont beaucoup utilisés dans l'évaluation des modèles (Belanger et al., 2005 ; Koffi et al., 2007 ; Koffi et al., 2012).

Pour comparer les moyennes de transmissivité observée et celles des transmissivités simulées, le test t de Student a été appliqué au seuil de 95%.

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) a été utilisée comme une mesure de la performance globale du modèle. Le modèle est bien optimisé si la valeur de RMSE est proche de zéro, ce qui tend vers une parfaite prévision. Sa formulation mathématique est donnée par la relation suivante (équation 4):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T'_i)^2}{n}} \quad (4)$$

avec :

T_i : transmissivités observées en m^2/h ;

T'_i : transmissivités simulées en m^2/h ;

n : taille de l'échantillon.

Le biais est un critère permettant de mettre en évidence l'écart entre deux grandeurs. Il doit être minimisé (l'optimum est la valeur nulle). Il donne alors l'erreur relative entre les valeurs observées et celles simulées lors des analyses. Lorsque la moyenne biaisée « B » tend vers zéro, les résultats du modèle sont sans biais, c'est-à-dire que les deux valeurs sont proches et donc le modèle est performant. Ce paramètre est défini par la relation suivante (équation 5):

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_i - T'_i| \quad (5)$$

avec :

T_i : transmissivités observées en m^2/h ;

T'_i : transmissivités simulées en m^2/h .

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Résultats de l'analyse statistique des paramètres de conception des modèles

Le test t de Student appliqué au seuil de 95% aux données de transmissivité montre que la valeur de t (t expérimental: 10,666) est supérieure à celle de t' (t théorique : 1,96). On peut donc conclure que les deux échantillons de transmissivité sont statistiquement différents du point de vue statistique. Le test de Student appliqué au seuil de 95% aux données de débit spécifique montre que la valeur de t (t expérimental: 12,605) est supérieure à celle de t' (t théorique: 1,96). On peut donc conclure que les deux échantillons de débit spécifique sont statistiquement différents du point de vue statistique. On en déduit que les différents échantillons des deux sites tests n'appartiennent pas du point de vue statistique à une même population. Au regard de ce qui précède, les échantillons ont été traités séparément.

Les valeurs de débits spécifiques au niveau de la région de Guiglo-Duekoué, varient entre $1,427 \cdot 10^{-2}$ et $2,571 m^2/h$ avec une moyenne de $0,279 m^2/h$ et un coefficient de variation de 159%. La classe de débit spécifique la plus remarquable est celle des débits spécifiques moyens $[0,1 ; 1 m^2/h[$ avec un pourcentage de 57,14% . A côté de cette classe dominante, on a la classe des débits spécifiques faibles $[00 ; 0,1 m^2/h[$ avec un taux de 38,77% suivie de la classe des débits spécifiques forts (débit spécifique supérieur à $1 m^2/h$) avec un taux de 4,08%. Quant à la région de l'ex-N'zi-Comoé, les débits spécifiques vont de $7,752 \cdot 10^{-3}$ à $3,03 m^2/h$ avec une moyenne de $0,402 m^2/h$ et un

coefficient de variation de 116%. La classe de débit spécifique la plus dominante est celle des débits spécifiques moyens avec un pourcentage de 70%. Elle est suivie par la classe des débits spécifiques faibles avec un pourcentage de 18%. Les débits spécifiques forts constituent 12% de l'échantillon.

Les valeurs de transmissivité au niveau de la région de Guiglo-Duekoué fluctuent entre $1,779.10^{-3}$ et $1,952 \text{ m}^2/\text{h}$ avec une moyenne de $0,283 \text{ m}^2/\text{h}$ et un coefficient de variation de 135%. L'analyse des transmissivités révèle une prédominance de la classe moyenne [10^{-5} ; 10^{-4}] (51,02%) suivie de celle de la classe faible ($<10^{-5}$) (26,53%). La classe des fortes valeurs de transmissivité représente 22,45%. Les forages ayant une transmissivité supérieure à 10^{-5} (classes moyenne et forte) représentent 73,47%. Quant à la région de l'ex-N'zi-Comoé, la transmissivité oscille entre $6,2.10^{-3}$ et $1,302 \text{ m}^2/\text{h}$ avec une moyenne de $0,196 \text{ m}^2/\text{h}$ et un coefficient de variation de 123%. Il a été mis en évidence une prédominance de la classe moyenne de transmissivité (63,33%) suivie de celle de la classe faible (21,33%). Les fortes valeurs de transmissivité représentent 15,33%. Les forages ayant une transmissivité supérieure à 10^{-5} (classes moyenne et forte) représentent 68,66%.

Les fréquences relatives des données de transmissivité et de débit spécifique transformées selon la fonction logarithme des deux zones tests ont représentées (Figures 5 et 6).

Les résultats de l'application du programme Khronostat 1.01 ont mis en évidence que les données de transmissivité et de débit spécifique, transformées selon la fonction logarithme, suivent la loi normale. Le test de conformité de Khi-deux qui sert à évaluer les écarts entre les valeurs théoriques et empiriques sur des observations données montre que l'ajustement à la loi lognormale des données de transmissivité et de débit spécifique est satisfaisant au seuil de signification de 95% (Tableau 1). La distribution des variables selon la loi lognormale permet d'envisager une modélisation de la relation $T=f(Q_s)$.

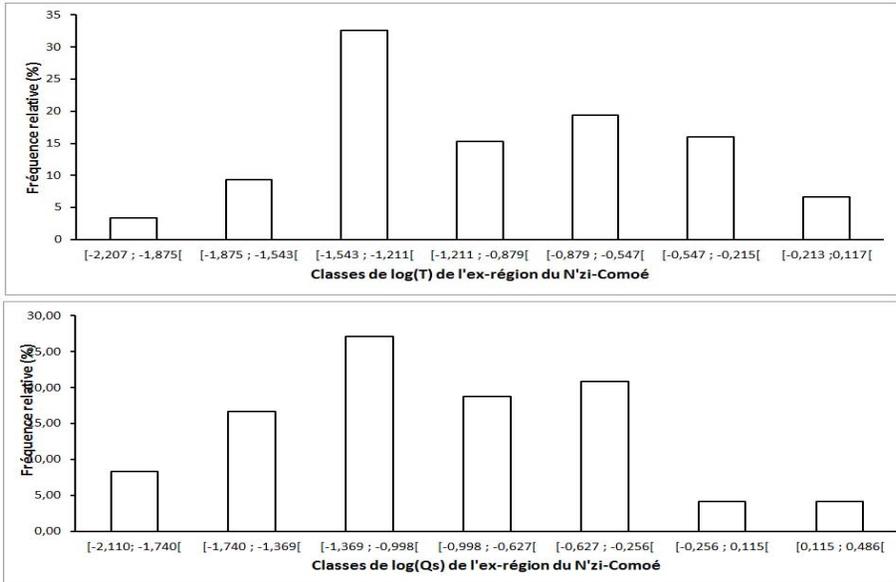


Figure 5 : Histogrammes des fréquences de log(T) et de log(Q_s) de l'ex-région du N'zi-Comoé

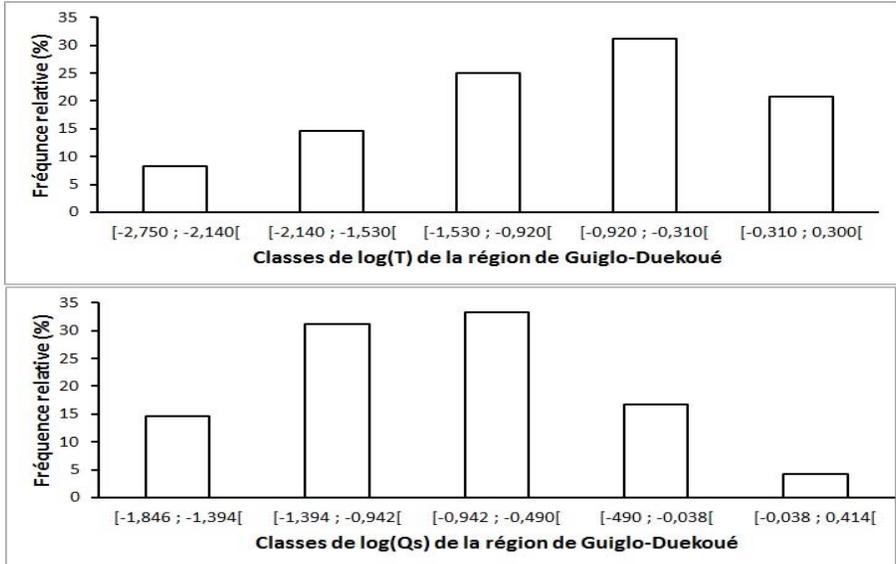


Figure 6 : Histogrammes des fréquences de log(T) et de log(Q_s) de la région de Guiglo-Duekoué

Tableau 1 : Résultats du test de Khi-deux

Paramètres	Zones tests	Khi-2 Expérimental	Khi-2 Théorique	Degré de liberté
Log(T)	Ex-N'zi-Comoé	9,38	9,49	4
	Guiglo- Duekoué	2,63	5,99	2
Log(Q _s)	Ex-N'zi-Comoé	5,08	9,49	4
	Guiglo- Duekoué	0,45	5,99	2

Résultats de modélisation de la transmissivité

Des représentations graphiques mettant en relation les valeurs de transmissivité et celles de débit spécifique ont été réalisées (Figures 7 et 8). L'analyse des graphes montre que les différents points sont très peu dispersés. Les nuages de points présentent une certaine tendance et s'organisent suivant une droite sur laquelle il est possible d'ajuster une droite de régression (Figures 5 et 6). Les régressions linéaires obtenues entre les valeurs de transmissivité (m²/h) et celles de débits spécifiques (m²/h) pour l'ensemble des deux zones tests sont:

i) région du N'zi-Iffou-Moronou (Figure 7): modèle 1

$$\text{Log}(T) = 0,8544x\text{Log}(Q_s) - 0,451 \tag{6}$$

$$T = 0,354Q_s^{0,8544} \tag{7}$$

ii) région de Guiglo-Duekoué (Figure 8): modèle 2

$$\text{Log}(T) = 1,187x\text{Log}(Q_s) + 0,036 \tag{8}$$

$$T = 1,086Q_s^{1,187} \tag{9}$$

La valeur du coefficient de détermination (R²) au niveau de la région de N'zi-Iffou-Moronou indique que près de 60% de la variance de la transmissivité est expliquée par le débit spécifique de forage. Ce qui traduit une forte corrélation (R=0,77) entre la transmissivité et le débit spécifique. Quant à la région de Guiglo-Duekoué, la valeur du coefficient de détermination (R²) indique que 69% de la variance de la transmissivité est expliquée par le débit spécifique de

forage. Ce qui traduit une forte corrélation ($R=0,84$) entre la transmissivité et le débit spécifique.

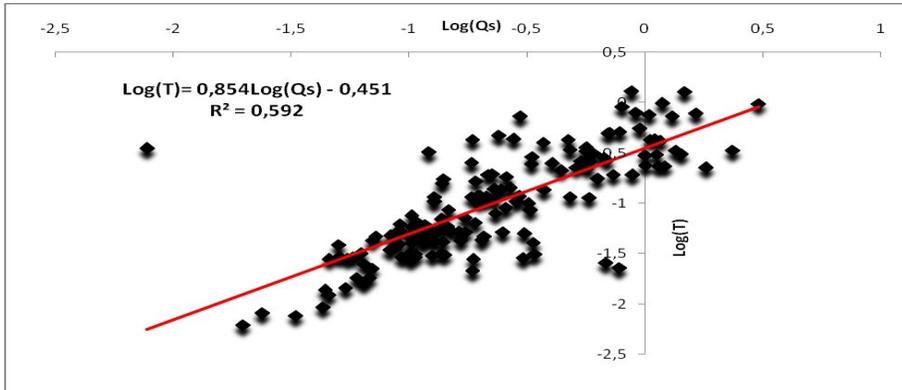


Figure 7 : Relation entre transmissivité et débit spécifique dans la région du N'zi-Iffou-Moronou

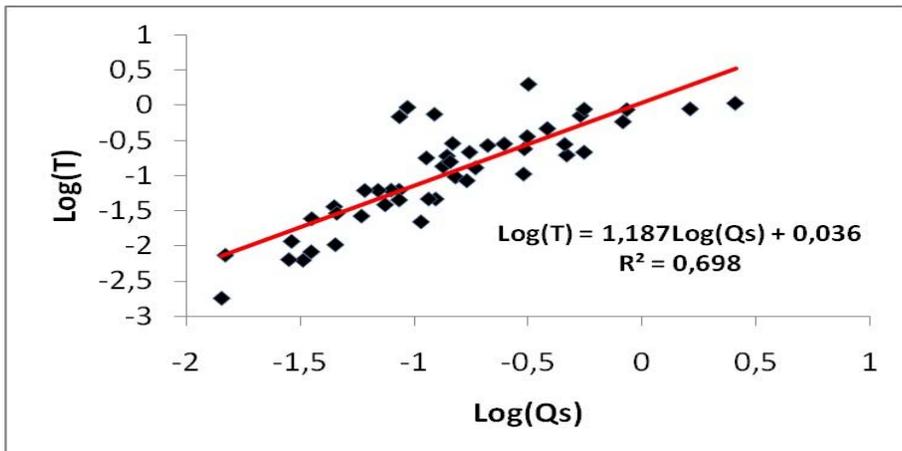


Figure 8 : Relation entre transmissivité et débit spécifique dans la région de Guiglo-Duekoué

Les transmissivités ont été simulées par le modèle 1 avec une incertitude de $\pm 0,024$. Au niveau du modèle 2, l'incertitude est estimée à $\pm 0,024$. Les transmissivités simulées par les deux modèles développés et les transmissivités

observées ont été soumises au test *t* de Student au seuil de 95%. Les différents résultats obtenus sont résumés dans le tableau 2. Ces résultats montrent que les valeurs de *t* (*t* expérimental) sont toutes inférieures aux valeurs de *t'* (*t* théorique). Mais, le test de Student a été le plus significatif au niveau du modèle 2 (Guiglo-Duekoué). On peut donc conclure que la différence entre les moyennes des valeurs de transmissivité observées et simulées n'est pas significative du point de vue statistique.

Tableau 2 : Résultats du test *t* de Student

	<i>t</i> (valeur expérimentale)	<i>t'</i> (valeur théorique)
Modèle 1	1,875	1,96
Modèle 2	0,046	1,99

Les résultats de l'analyse globale basée sur les comparaisons des caractéristiques des échantillons ont été approfondis à travers l'évaluation des critères de performance tels que le biais sur la moyenne et l'erreur quadratique.

Les résultats d'analyse des performances des différentes simulations effectuées en termes de biais et d'erreurs quadratiques sont consignés dans le tableau 3. Les valeurs de Biais (10^{-6} - 10^{-2}) et de RSME (10^{-4} - 10^{-1}) pour les deux modèles sont très satisfaisantes parce qu'elles sont quasiment nulles. Mais, les performances sont plus satisfaisantes au niveau du modèle 2. Ces résultats montrent que les deux modèles sont performants au regard des différents critères de performance.

Tableau 3 : Résultats de performance en termes de biais et erreurs quadratiques

	Biais	RMSE
Modèle 1	$4,368.10^{-2}$	$1,82.10^{-1}$
Modèle 2	$1,05.10^{-6}$	$1,33.10^{-4}$

DISCUSSION

La valeur du coefficient de détermination (R^2) au niveau de la région de N'zi-Iffou-Moronou est de 0,60 alors que celle obtenue dans la région de Guiglo-Duekoué est de 0,69. Le modèle 2 a enregistré la valeur de coefficient de détermination la plus élevée. Différentes relations empiriques entre T et Q/s ont été proposées dans les aquifères fracturés en Afrique et ailleurs en général et en Côte d'Ivoire en particulier. Ainsi en Côte d'Ivoire, on a enregistré les travaux de Razack et Lasm (2006) dans les aquifères du domaine archéen plus précisément dans la région de Man-Danané, à l'Ouest de la Côte d'Ivoire [$T = 0,89(Q/s)^{1,30}$; $R^2 = 0,88$]. Dans le domaine paléoprotérozoïque, des études ont été également réalisées. Il s'agit de celles de Soro et al. (2010) dans le Centre du pays plus exactement dans la région des Lacs (actuelle région du Belier) [$T = 0,937(Q/s)^{1,188}$; $R^2 = 0,824$], Onetie et al. (2010) dans la région de Korhogo [$T = 1,591(Q/s)^{1,144}$; $R^2 = 0,992$], Lasm et al. (2012) dans le département de Ferké [$T = 0,9876(Q/s)^{0,8027}$; $R^2 = 0,9524$]. Dans le domaine SASCA, on peut citer les travaux de De lasme et al. (2012) dans la région de San-Pedro [$T = 0,848(Q/s)^{1,16}$; $R^2 = 0,86$]. Dans l'ensemble, les coefficients de détermination obtenus dans le cadre de cette étude sont inférieurs à ceux des travaux antérieurs. Pour les mêmes environnements géologiques, on constate des résultats obtenus différents des travaux antérieurs. Toute chose qui indique qu'elles sont réellement spécifiques au site d'étude (Razack et Lasm, 2006).

Les coefficients du modèle 2 ($\alpha=1,086$ et $\beta=1,187$) sont respectivement supérieurs à ceux du modèle 1 ($\alpha=0,354$ et $\beta=0,8544$). En considérant l'échantillon des travaux antérieurs précités, la valeur de α varie entre 0,848 et 1,591 avec une moyenne de 0,893 et un écart-type de 0,365. La valeur α_1 obtenue dans le cadre de ce travail est inférieure à la valeur minimale (0,848) des résultats des travaux antérieurs. Quant à α_2 , il est compris entre la moyenne (0,893) et la valeur maximale (1,591). Sur la base du même échantillon des travaux antérieurs, la valeur de β (pente) oscille entre 0,803 et 1,3 avec une moyenne de 1,016 et un écart-type de 0,235. Les différentes valeurs de pente obtenues dans cette étude appartiennent à l'intervalle des valeurs obtenues par les travaux antérieurs [0,803-1,3]. En effet, la pente obtenue dans le domaine archéen est légèrement plus faible que celle de Razack et Lasm (2006). Quant au domaine protérozoïque, la pente obtenue dans ce travail, est presque similaire à celle de Soro et al. (2010) et reste supérieure à la plupart des valeurs obtenues par les autres auteurs. La similitude entre ces résultats peut expliquer le fait que ces aquifères pourraient avoir le même comportement hydrodynamique. La valeur 1,16 obtenue à San Pedro est relativement proche

de celle obtenue dans la région de N'zi-Iffou-Moronou. Les auteurs tels que Hamm et al. (2005), Razack et Lasm (2006), en comparant différentes relations empiriques de différents systèmes aquifères ont conclu que la différence entre les constantes de régression est probablement due à la géologie, au développement du puits, aux caractéristiques hydrauliques des aquifères, à la profondeur d'équipement, à la durée de pompage, à la pénétration partielle du puits, au coefficient d'emmagasinement et aux modèles utilisés pour déterminer les paramètres des aquifères.

Au regard des performances en termes de biais et d'erreur quadratique entre les valeurs de transmissivité de base et les valeurs simulées d'une part, et l'application du test de Student au seuil de 95%, il ressort que les deux modèles développés sont performants. Bien que spécifique à l'environnement géologique dans lequel il a été conçu de façon générale, une transposabilité de ces modèles est possible.

Toutefois, selon plusieurs auteurs (Jalludin et Razack, 2004 ; Onetie et al., 2010), la relation empirique entre la transmissivité et le débit spécifique peut comporter des incertitudes dues aux effets des pertes de charge dans le puits, si les rabattements mesurés ne sont pas corrigés. Selon Yidana et al. (2007), les propriétés hydrauliques des aquifères résulteraient d'une fracturation secondaire induite par des événements structuraux régionaux dans les roches et non pas seulement d'une porosité primaire. En milieu discontinu, les réseaux fissurés conducteurs sont de géométrie complexe suite à une histoire structurale polyphasée ce qui leur confère des propriétés hydrauliques très variables. La transmissivité tout comme le débit spécifique sont affectés par la perte de charge dans le puits. Ainsi, si les pertes de charge sont élevées, la relation entre T et Q/s se trouve très biaisée (Hamm et al., 2005). Par ailleurs, une correction du débit spécifique des pertes de charge peut permettre d'obtenir une estimation précise de la transmissivité. Dans cette étude, le débit spécifique n'a pas été corrigé des pertes de charge. De ce fait, la relation entre T et Q/s pourrait se trouver affectée à cause de l'effet dû à ces pertes de charge. D'autre part, une estimation indirecte de ces pertes de charge est incertaine et pourrait causer des estimations imprécises de la transmissivité (Hamm et al., 2005). Les paramètres de l'équation de régression obtenus entre T et Q/s sont affectés par l'hétérogénéité de l'aquifère. Ainsi, chacun de ces facteurs pourrait donc affecter les paramètres de l'équation de régression. La compréhension et la prise en compte de ces facteurs permettraient d'expliquer la variabilité de ces différentes relations empiriques et aussi d'améliorer la relation trouvée dans cette étude.

Les transmissivités simulées avec les relations empiriques antérieures à partir des données de débit spécifique des deux zones tests ont été comparées à celles simulées par les modèles conçus. On constate que les transmissivités obtenues à partir des modèles antérieurs pour un débit spécifique donné, sont deux à trois fois supérieures aux transmissivités simulées au niveau des aquifères de la région du N'zi-Iffou-Moronou. Dans le cas de la région de Guiglo-Duekoué, les comparaisons effectuées montrent que pour un débit spécifique donné, les transmissivités simulées au niveau de Korhogo et Ferké sont supérieures à celles de Guiglo-Duekoué. Cependant, les transmissivités simulées au niveau des régions de Man-Danané, Belier, San Pedro et N'zi-Iffou-Moronou sont inférieures à celles de la région de Guiglo-Duekoué. Des valeurs beaucoup rapprochées au niveau des moyennes des valeurs de transmissivité ont été obtenues au niveau des régions de Man-Danané et San Pedro. En effet, le domaine SASCA est une continuité des domaines archéen et paléoprotérozoïque. Les valeurs de transmissivité de la région du Belier tendent vers celles obtenues dans la région de Guiglo-Duekoué. Ici, on peut évoquer une similitude des formations géologiques en place dominées par des granitoïdes.

CONCLUSION

Les valeurs de débits spécifiques au niveau de la région de Guiglo-Duekoué, varient entre $1,427.10^{-2}$ et $2,571 \text{ m}^2/\text{h}$ avec une moyenne de $0,279 \text{ m}^2/\text{h}$ et un coefficient de variation de 159%. Les débits spécifiques moyens et forts représentent 61,22%. Quant à la région de l'ex-N'zi-Comoé, les débits spécifiques vont de $7,752.10^{-3}$ à $3,03 \text{ m}^2/\text{h}$ avec une moyenne de $0,402 \text{ m}^2/\text{h}$, un coefficient de variation de 116% et un taux de 82% en ce qui concerne les débits spécifiques moyens et forts. Les valeurs de transmissivité de la région de Guiglo-Duekoué fluctuent entre $1,779.10^{-3}$ et $1,952 \text{ m}^2/\text{h}$ avec une moyenne de $0,283 \text{ m}^2/\text{h}$ et un coefficient de variation de 135%. Les forages ayant une transmissivité supérieure à 10^{-5} (classes moyenne et forte) représentent 73,47% de l'ensemble des ouvrages étudiés. Pour ce qui concerne la région de l'ex-N'zi-Comoé, la transmissivité oscille entre $6,2.10^{-3}$ et $1,302 \text{ m}^2/\text{h}$ avec une moyenne de $0,196 \text{ m}^2/\text{h}$ et un coefficient de variation de 123%. Les forages ayant des valeurs de transmissivité moyennes et fortes représentent 68,66%. Les résultats de l'ajustement ont montré que les données de transmissivité et de débit spécifique, transformées selon la fonction log, suivent la loi normale. La distribution des variables selon la loi log-normale a permis d'envisager une modélisation de la relation $T=f(Q_s)$. Ainsi, deux relations empiriques performantes ont été établies. Les deux modèles conçus sont respectivement

$T_1=0,354Q_s^{0,8544}$ avec $R^2=0,70$ pour la région du N'zi-Iffou-Moronou (ex-région du N'zi-Comoé) et $T_2=1,086Q_s^{1,187}$ avec $R^2=0,60$ pour la région de Guiglo-Duekoué. Ces modèles empiriques peuvent être utiles pour d'autres aquifères présentant des conditions hydrogéologiques similaires. La pertinence scientifique de ce travail réside dans le fait qu'il apporte des relations empiriques supplémentaires à celles existantes et permet donc de comparer. Cependant, ces modèles pourraient être améliorés en corrigeant le débit spécifique des pertes de charge.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BELANGER M., EL-JABI N., CAISSIE D., ASHKAR F., RIBI J.M. (2005). Estimation de la température de l'eau en rivière en utilisant les réseaux de neurones et la régression linéaire multiple. *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol.18, n°3, 403-421.
- BROU Y.T. (2005). Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Techniques de Lille, France, 212 p.
- DE LASME Z.O., LASM T., OGA M.S., YOUANTA M., BAKA D., ETTIEN B.F., KOUAKOU S., ONETIE O.Z., KOFFI Y.T. (2012). Analyse des propriétés hydrodynamiques des aquifères fissurés de la région de San-Pedro (Sud de la Côte d'Ivoire). *Estudios Geologicos*, Vol.68, n°2, 217-232.
- GNAMBA F.M., OGA Y.M.S., GNANGNE T., LASM T., BIEMI J., KOUAKOU Y.K.N. (2014). Analyse de la productivité des aquifères de fissures du socle paléoprotérozoïque de la région de Katiola (Centre-Nord de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, Vol.10, n°5, 1-20.
- GUÉRIN R. (2005). Borehole and surface-based hydrogeophysics. *Journal of Hydrogeology*, n°13, 251-254.
- HAMM S.Y., CHEONG J.Y., JANG S, JUNG C.Y., KIM B.S. (2005). Relationship between transmissivity and specific capacity in the volcanic aquifers of Jeju Island, Korea. *Journal of Hydrology*, n°310, 111-121.
- JALLUDIN M., RAZACK M. (2004). Assessment of hydraulic properties of sedimentary and volcanic aquifer systems under arid conditions in the Republic of Djibouti (Horn of Africa). *Hydrogeology Journal*, n°12, 159-170.
- JOURDA J.P.R., DJAGOUA E.V., KOUAME K.F., SALEY M.B., GRONAYES C., ACHY J.J., BIEMI J., RAZACK M. (2006a). Identification et cartographie des unités lithologiques et des accidents structuraux majeurs du département de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : apport de l'imagerie ETM+ de Landsat. *Téledétection*, Vol. 6, n°2, 123-142.

- JOURDA J.P.R., SALEY M.B., DJAGOUA E.V., KOUAME K.F., BIEMI J., RAZACK M. (2006b). Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire): approche par analyse multicritère et test de validation. *Télétection*, Vol. 5, n°4, 339-357.
- KOFFI Y.B., AHOUSSE K.E., KOUASSI A.M., KPANGUI L.C., BIEMI J. (2012). Modélisation de la consommation en eau potable dans les capitales africaines au sud du Sahara: application des réseaux de neurones formels à la ville de Yamoussoukro, capitale politique de la Côte d'Ivoire. *Journal of Asian Scientific Research*, Vol.2, n°10, 562-573.
- KOFFI Y.B., LASM T., AYRAL P.A., JOHANNET A., KOUASSI A.M., ASSIDJO E., BIEMI J. (2007). Optimisation des modèles Perceptrons Multicouches avec les algorithmes de premier et de deuxième ordre. Application à la modélisation de la relation pluie-débit du Bandama Blanc, Nord de la Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, Vol.17, n°3, 313-328.
- KOITA M., JOURDE H., RUELLAND D., KOFFI K., PISTRE S., SAVANE I. (2010). Cartographie des accidents régionaux et identification de leur rôle dans l'hydrodynamique souterraine en zone de socle. Cas de la région de Dimbokro-Bongouanou (Côte d'Ivoire). *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol. 55, n°5, 805-820.
- KOUAMELAN A.N. (1996). Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïque de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire - Implications pour la transition Archéen-Protérozoïque ». Thèse de Doctorat Es Sciences Naturelles, Université Rennes I, Mémoires, Géosciences Rennes, n° 73, 289 p.
- LASM T., FOSSOU R.M.N., SORO N., ONETIE O.Z., BAKA D., YOUANTA M., OGA M.S., SORO N. (2012). Contribution hydrogéologique à la connaissance des aquifères discontinus du département de Ferké (Nord de la Côte d'Ivoire) pour une meilleure alimentation en eau potable. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, n°19, 114-135.
- LASM T., KOUAME K.F., SORO N., JOURDA J.P.R., BIEMI J. (2004). Analyse géostatistique de la fracturation extraite de l'imagerie spatiale aéroportée et satellitaire. Application à la région de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, n°5, 135-154.
- LASM T., YOUANTA M., JOURDA J.P.R., KOUAME K.F. (2008). Fracture Networks Analysis in Crystalline Basement: Case of Bondoukou Area (Northeast Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, Vol. 21, n°1, 196-208.
- N'GO Y.A., LASM T., KOITA M., SAVANE I. (2010). Extraction par télédétection des réseaux de fractures majeures du socle précambrien de la région de Dimbokro (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). *Télétection*, Vol. 9, n°1, 33-42.
- ONETIE O.Z., LASM T., BAKA D., FOSSOU R.M.N., KOUAKOU O.S., YOUANTA M., DE LASME O., OGA M.S., SORO N. (2010). Influence des pertes de

- charges quadratiques sur la transmissivité et le débit spécifique déterminés sur des forages isolés : cas de la région de Korhogo au Nord de la Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, n°16, 261-283.
- RAZACK M., LASM T. (2006). Geostatistical estimation and crystalline aquifer (Mandane Region, Western Ivory Coast) of the transmissivity in a highly fractured metamorphic. *Journal of Hydrology*, n°325, 164-178.
- ROTZOLL K., EL-KADI A.I. (2008). Estimating hydraulic properties of coastal aquifers using wave setup. *Journal of Hydrology*, n°353, 201-213.
- SEBAITI B.A., HANI A., DJABRI L. (2012). Amélioration de l'estimation de la transmissivité dans une nappe alluviale à l'aide des réseaux de neurones artificiels. *Courrier du Savoir*, n°13, 13-19.
- SINAN M., RAZACK M. (2006). Estimation du champ de transmissivité d'un aquifère alluvial fortement hétérogène à partir de la résistance transversale. Application à la nappe du Haouz de Marrakech (Maroc). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, Vol. 19, n°3, 221-232.
- SORO G., SORO N., AHOUSSE K.E., LASM T., KOUAMÉ F.K., SORO T. D., BIÉMI J. (2010). Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères fracturés des formations cristallines et métamorphiques dans la région des lacs (Centre de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, Vol. 2, n°66, 1-16.
- SOROKOBY V.M., SALEY M.B., KOUAME K.F., DJAGOUA M.E.V., BERNIER M., AFFIAN K., BIEMI J. (2010). Utilisation des images Landsat ETM+ et du SIRS pour la cartographie linéaire et thématique de Soubré-Meagui (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire): contribution à la gestion des ressources en eau souterraine. *Téledétection*, Vol. 9, n°3-4, 209-223.
- TAGINI B. 1971. Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale. Thèse de Doctorat, Université de Lausanne, SODEMI, Abidjan-Côte d'Ivoire, 302 p.
- YAO D.B. (1998). Lithostratigraphie et pétrographie des formations birimiennes de Toumodi-Fétékro (Côte d'Ivoire). Implication pour l'évolution crustale du paléoprotérozoïque du craton ouest-africain. Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans, France, 190p.
- YIDANA S.M., OPHORI D., BANOENG-YAKUBO B. (2007). Hydrogeological and hydrochemical characterization of the Voltaian Basin: the Afram Plains area, Ghana. *Environmental Geology*, n°54, 1751-1762.
- YOUANTA M., LASM T., JOURDA J.P., KOUAME K.F., RAZACK M. (2008). Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire Landsat-7 ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). *Téledétection*, Vol.8, n°2, 119-135.